

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Белорусско-Российский университет»

На правах рукописи  
УДК 620.179.14

КУШНЕР АНДРЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРИ  
НАМАГНИЧИВАНИИ ИЗДЕЛИЙ  
ПЕРЕМЕЩАЕМЫМ ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ  
ЧЕРЕЗ МАГНИТОНОСИТЕЛЬ**

Специальность 05.11.13-  
«Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Могилев 2011

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физические методы контроля» Новиков Владимир Алексеевич, ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электромагнетизма Гусев Александр Петрович, ГНУ «Институт прикладной физики» НАН Беларуси, г. Минск;

- доктор технических наук, зав. сектором «Трибодиагностика» Маркова Любовь Васильевна, ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» г. Гомель.

Оппонирующая организация – УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск.

Защита диссертации состоится «21» октября 2011г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.01 при Белорусско-Российском университете по адресу: 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Телефон ученого секретаря 8-0222-22-52-12

Ученый секретарь Совета по защите диссертаций,

доктор физико-математических наук, профессор



В.И. Борисов

## ВВЕДЕНИЕ

К значительным материальным потерям и человеческим жертвам может привести выход из строя в процессе эксплуатации некоторых объектов. Это балки несущих конструкций, винты речных и морских судов, стенки осевых каналов роторов турбин, гибы труб, лопасти летательных аппаратов, оси и опоры вагонов, буровое оборудование, литые детали и др. Такие объекты иногда покрыты слоем краски или в процессе эксплуатации подвергаются коррозии. Чтобы предотвратить преждевременное разрушение, их необходимо контролировать на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов. Применяемые для этих целей неразрушающие методы контроля (акустические, магнитопорошковый, феррозондовый и др.) не позволяют отличить наиболее опасные дефекты от других, имеют низкую производительность, требуют тщательной подготовки поверхности объекта, иногда с их помощью сложно проконтролировать труднодоступные места, детали в узлах.

Весьма перспективным для обнаружения дефектов в таких объектах является магнитографический метод контроля (МГМК), который характеризуется высокой производительностью и экономичностью, не требует предварительной зачистки поверхности контролируемого изделия, однако намагничивающие устройства для реализации этого способа отличаются большими весом и габаритами, необходимостью изготовления дополнительных полусных наконечников и использования мощных источников питания. Кроме того, этот метод не позволяет отличить трещины и узкие несплавления от рисок, поверхностных углублений, широких дефектов.

Предпочтительным является способ МГМК, при котором объект намагничивают перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, уложенный на его поверхность [1]. Он позволяет повысить мобильность метода контроля, снизить потребление электроэнергии. Однако этот способ МГМК подробно не исследован, а поэтому не нашел широкого практического применения. Его развитию посвящена настоящая работа.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Работа выполнена в рамках следующих программ и тем: «Исследование и разработка программно-аппаратного комплекса для магнитографического контроля ферромагнитных изделий», ГБ-018ф, №ГР2001413, 2001 г; «Исследования по разработке способов и средств магнитографической дефектоскопии, путей повышения достоверности контроля» по заданию «Приборостроение 2.10» ГППНИ «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ» на 2004–2005 гг, ГБ-043ф, №ГР20042965; «Исследования по разработке способов и средств магнитографической дефектоскопии фасонных изделий в процессе их эксплуатации и ремонта без предварительной зачистки объекта», ГБ0621ф, №ГР 20061427, 2006 – 2007 гг; «Исследование гистерезисных явлений в магнитной

ленте и контролируемом металле с целью повышения достоверности магнитографического контроля дефектов металлоконструкций» по заданию «Техническая диагностика 08» ГКПНИ на 2006 – 2010 гг, ГБ-0614ф, №ГР 20061433; ХД-0509 «Проведение магнитографического контроля стенок осевых каналов роторов высокого и среднего давления турбины К-300-240 ст. №7 Лукомльской ГРЭС в г. Новолукомль», 2004 –2005 гг; ХД-04198 «Разработка устройств и методики контроля деталей вагонов», 2004 –2005гг.

Диссертация соответствует **приоритетному направлению** фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 гг: 2. «... обеспечение надежности и безопасности технических систем, повышение конкурентоспособности машиностроения».

### **Цель и задачи исследований**

**Цель работы** – повышение достоверности обнаружения дефектов в ферромагнитных объектах на основе разработки и внедрения способов и устройств для магнитографического контроля, позволяющих отличить наиболее опасные дефекты за счет намагничивания изделий через магнитоноситель перемещаемым постоянным магнитом, определения условий контроля и их стабилизации.

В соответствии с целью работы необходимо решить следующие **задачи**:

1 Провести исследования полей рассеяния и сигналов, обусловленных дефектами, при намагничивании ферромагнитного объекта неподвижным постоянным магнитом.

2 Исследовать поля рассеяния и сигналограммы, обусловленные дефектами, при намагничивании ферромагнитных объектов перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель.

3 Исследовать процесс записи магнитных полей рассеяния дефектов на магнитоноситель и формирования сигналограмм при магнитографическом контроле объектов, намагничиваемых перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, и определить условия контроля.

4 Внедрить магнитографический метод контроля с намагничиванием изделий перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, намагничивающие устройства и методики магнитографического контроля изделий.

**Объект исследования** – ферромагнитные изделия, содержащие поверхностные и подповерхностные дефекты.

**Предмет исследования** – магнитные поля в зоне дефектов, появляющиеся при намагничивании объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, и сигналы, возникающие при считывании записи с магнитоносителя.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Закономерности изменения магнитного поля в зоне поверхностного дефекта объекта, намагниченного *неподвижным* постоянным магнитом, обращенным к объекту гранью с одним полюсом, учитывающие изменение намагничивающего поля с увеличением глубины и расстояния от плоскости симметрии магнита до дефекта, позволившие объяснить вид сигнала, обусловленного дефектом, при магнитографическом контроле.

2. Экспериментально определенные условия контроля (коэрцитивная сила ленты, угол наклона магнита к поверхности объекта, расстояние между магнитом и контролируемой поверхностью и др.) ферромагнитных объектов, при которых *одновременно* обеспечивается наибольшая чувствительность метода контроля и селективность к виду дефекта, при этом наиболее опасные дефекты (трещины, сквозные и узкие несквозные несплошности) обнаруживаются двуполярными сигналами, а другие несплошности (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплошности) – однополярными.

3. Теоретические и экспериментальные зависимости вида сигнала, обусловленного дефектом, от условий намагничивания ленты (соотношение между остаточной намагниченностью участка ленты, находившегося в зоне действия поля рассеяния дефекта, и ее остаточной намагниченностью, вызванной полем перемещаемого магнита), объясняющие причину трансформации и смены полярности сигнала и позволяющие отличить наиболее опасные дефекты (трещины, сквозные и узкие несквозные несплошности) от других.

4. Способ повышения чувствительности и исключения пропуска наиболее опасных дефектов, заключающийся в намагничивании перемещаемым постоянным магнитом контролируемой зоны с уложенным магнитоносителем через зазор, который выбирают из условия максимального отношения сигнал/шум при использовании новых информационных параметров – размах и вид сигнала.

5. Теоретические и экспериментально установленные условия предварительной подготовки и расположения проградуированного ленточного локального магнитоносителя (ЛЛМ) (предварительное намагничивание ЛЛМ и расположение так, чтобы измеряемое поле было противоположно направлению его остаточной намагниченности), позволяющие измерять на поверхности объекта слабые магнитные поля величиной менее 40% от значения коэрцитивной силы используемого ЛЛМ.

**Личный вклад соискателя.** Работы, опубликованные по теме диссертации, выполнены автором лично и в соавторстве. Научному руководителю принадлежат основные идеи работ. Соавторами по опубликованным работам являются профессор Новиков В.А., доцент Скрябина Г.И. и Шилов А.В. В опубликованных работах автор осуществлял постановку задач, предлагал направления решения научных проблем, участвовал в теоретических и экспериментальных исследованиях, в формулировке подходов при установлении закономерностей изменения сигналов, обусловленных дефектами, при исследуемом способе МГМК, в разработке эффективных способов и технических средств магнитографического контроля изделий, в формулировке выводов по результатам работы.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы докладывались на МНТК: «Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов» (г. Могилев, МГТУ, 2001 г.); «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (г. Могилев: МГТУ, 2004); «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, Бел.-Рос. ун-т, 2004 г., 2006 г – 2010 г.); «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (г. Могилев, Бел.-Рос. ун-т, 2004 г., 2006г. ); на РНТК молодых ученых «Новые

материалы, оборудование и технологии в промышленности», (Могилев, Бел.-Рос. ун-т, 2008).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 33 печатных работах, в том числе в 11 статьях (из них 10 включены в перечень ВАК), материалах 17 международных и республиканской научно-технических конференций, в описаниях 3 патентов на изобретения и 2 патентов на полезные модели. Общее количество опубликованного материала – 8,5 п.л. Кроме того, основные результаты диссертации включены в 6 отчетов по НИР.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 182 стр. печатного текста, состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложения. Работа содержит 91 стр. основного текста, 90 рисунков, включенных в текст, 1 таблицу и 144 библиографических ссылок на 15 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы, показана ее связь с крупными научными программами, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ литературных источников по теме диссертации. Отмечен большой вклад, внесенный в развитие магнитной дефектоскопии В. К. Аркадьевым, С. В. Вонсовским, Р. И. Янусом, А. Б. Сапожниковым, Н. Н. Зацепиным, В. Е. Щербининым, Ф. Фёрстером и др., а также в магнитографическую дефектоскопию А.С. Фалькевичем, М.Х. Хусановым, В.С. Козловым, А.М. Шаровой, О.А., Жолнеровичем, В.П. Куликовым, А.Е. Новиковым, С.П. Михайловым, В.А. Новиковым, А.П. Магилинским, А.М. Беляговым, А.П. Синицей и др.

Выполнен анализ моделей полей рассеяния дефектов при теоретических исследованиях полей несплошностей ферромагнитных объектов с плоской поверхностью. Показано, что модели полей рассеяния дефектов рассмотрены в основном применительно к намагничиванию объекта параллельно его поверхности. Намагничивание перпендикулярно поверхности изделия рассмотрено для случая симметричного расположения несплошности под полюсом магнита. Действие неоднородного поля в зоне дефекта изучалось при намагничивании объекта двумя бесконечно длинными магнитами. Нет расчета поля протяженного дефекта, смещенного относительно плоскости симметрии магнита и учитывающего ослабление намагничивающего поля при увеличении глубины. Отсутствуют теоретические работы для случая намагничивания объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель.

Анализ экспериментальных исследований по контролю объектов с плоской поверхностью показал, что они в основном относятся к случаю намагничивания параллельно контролируемой поверхности. Нет исследований полей рассеяния

дефектов и обусловленных ими сигналов при намагничивании объектов перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель.

Рассмотрение способов повышения чувствительности и разрешающей способности МГМК объектов при отсутствии выпуклости шва показало, что повышения эффективности МГМК можно достичь за счёт увеличения индукции в зоне контроля путем увеличения напряженности намагничивающего поля или правильного выбора направления намагничивания объекта, вследствие расширения магнитного отпечатка на ленте от дефекта микроскопического раскрытия, а также за счёт снижения фона помех. Практически все рассмотренные способы основаны на намагничивании объекта параллельно контролируемой поверхности. Перспективным представляется осуществлять намагничивание объекта при МГМК перемещаемым над контролируемой зоной с уложенной на ее поверхность магнитоносителем постоянным магнитом, так как в формировании поля рассеяния дефекта в этом случае участвует не только тангенциальная, но и нормальная составляющая внешнего поля [1]. Это позволит достичь большей информативности сигнала, снижения мощности и габаритов намагничивающих устройств, расширить область применения метода.

Во **второй главе** исследовано распределение магнитного поля вблизи уединенного постоянного магнита, используемого в экспериментах, описаны методики экспериментальных исследований. В качестве источника поля использовали постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда  $30 \times 20 \times 6,5$  мм из сплава  $28\text{CA}250$  ( $H_c = 240$  кА/м,  $B_r = 0,39$  Тл). При необходимости, высоту магнита увеличивали на отрезки, кратные 6,5 мм, путем пристыковки магнитов разноименными полюсными гранями. Исследования показали, что магниты позволяют создать поле напряженностью 100-700 А/см. В средней части магнита, на отрезке, составляющем около 70 % длины грани, изменение максимальной напряженности магнитного поля не превышает 6% [6-А, 15-А].

В **третьей главе** выбраны схемы намагничивания объекта, определены условия контроля, описаны результаты экспериментальных исследований.

Установлено, что *при записи на низкокоэрцитивную ленту* ( $H_c = 80$  А/см) наибольший размах сигнала от дефекта наблюдается при углах наклона магнита к поверхности объекта от  $0^\circ$  до  $5^\circ$  и от  $85^\circ$  до  $90^\circ$  при намагничивании «углом назад» и при углах от  $40^\circ$  до  $60^\circ$  в случае намагничивания «углом вперед». Полярность сигнала при переходе от намагничивания «углом назад» к намагничиванию «углом вперед» меняется на противоположную. Изменение направления перемещения магнита относительно протяженного дефекта «с дном» (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплошности) мало влияет на размах сигнала. Если магнит обращен к объекту гранью с одним полюсом, то при изменении расстояния  $\Delta$  между объектом контроля и магнитом от 0 до 0,4 мм и от 4 до 11 мм сигнал от протяженного дефекта «с дном» имеет наибольший размах. На этих участках сигналы принимают однополярный вид, но противоположной полярности. Наибольший размах сигнала наблюдается в диапазонах изменения высоты магнита от 6,5 до 13 мм и от 39 до 130 мм. Между указанными диапазонами высот происходит трансформация сигнала, а размах сигнала уменьшается. Дефекты «без дна» (трещина, сквозное и узкое несквозное

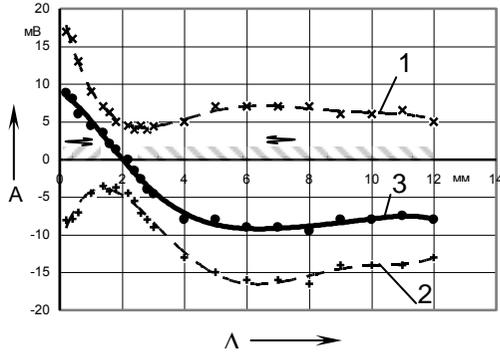
несплавление), а также несплошности глубиной более 18 мм всегда обнаруживаются двуполярным сигналом [4-А, 8-А, 12-А, 14-А, 20-А].

При записи на высококоэрцитивную ленту ( $H_c = 240 \text{ А/см}$ ) полярность сигнала, обусловленного как сквозным (двуполярный сигнал), так и широким ( $2b \geq 0,4 \text{ мм}$ ) несквозным дефектом (однополярный сигнал), остается неизменной, а размах сигнала монотонно убывает на исследованном участке изменения расстояния  $\Delta$  от 0,4 до 11 мм. Смены полярности сигнала при изменении высоты  $L$  магнита не происходит. Наибольший сигнал наблюдается при высоте магнита от 39 до 130 мм в исследованном диапазоне. Трансформации сигнала не происходит даже при увеличении глубины несплошности до 23 мм [9-А, 15-А, 20-А].

Таким образом, если намагничивание осуществляется постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями (высотой до 10 мм), обращенным к объекту гранью с одним полюсом, то с увеличением высоты магнита, при его удалении от контролируемой поверхности, при переходе от намагничивания «углом вперед» к намагничиванию «углом назад», при изменении угла наклона магнита, глубины дефекта, крутизны характеристики магнитной ленты может произойти смена полярности сигнала, обусловленного дефектом (рисунок 1). Трещины, сквозные и узкие несквозные несплавления обнаруживаются двуполярными, а дефекты «с дном» в зависимости от условий контроля – однополярными, трансформированными или двуполярными сигналами. Экспериментально определены условия МГМК, при которых *одновременно*: обеспечивается наибольшая чувствительность метода контроля и селективность к виду дефекта, при этом наиболее опасные дефекты, трещины, сквозные и узкие несквозные несплавления обнаруживаются двуполярными сигналами, а другие несплошности (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплошности) – однополярными, – что позволяет отличить наиболее опасные дефекты от других несплошностей по виду сигнала и повысить достоверность контроля [4-А, 8-А, 9-А, 15-А, 20-А, 24-А, 29-А, 33-А].

Характер сигналограмм, причины смены полярности сигнала, обусловленного дефектом, и его трансформации требуют объяснения. Было высказано предположение, что однополярный вид сигнала обусловлен тангенциальной составляющей поля в зоне дефекта, вызванной действием нормальной составляющей напряженности внешнего поля, а смена его полярности – гистерезисными явлениями в магнитной ленте при действии изменяющих направление нормальной и тангенциальной составляющих поля перемещаемого магнита.

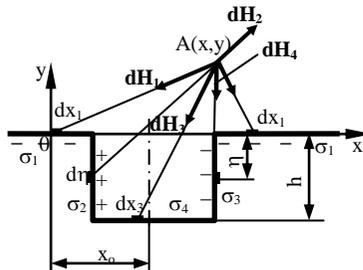
С целью объяснения вида сигнала, обусловленного дефектом, **в четвертой главе** методом «магнитных зарядов» выполнен расчет поля поверхностного дефекта в ферромагнитном объекте (и соответствующей сигналограммы) для случая, когда дефект находится вне плоскости симметрии неподвижного магнита, обращенного к объекту гранью с одним полюсом [11-А, 12-А].



1 – изменение положительной амплитуды сигнала; 2 – изменение отрицательной амплитуды сигнала; 3 – изменение алгебраической суммы амплитуд сигнала; знаками « $\rightleftarrows$ » и « $\rightleftarrows$ » указаны полярность и вид сигнала на заштрихованных участках

**Рисунок 1 – Влияние расстояния от объекта контроля до ближайшего полюса магнита высотой 6,5 на алгебраическую сумму положительной и отрицательной амплитуд сигнала, обусловленного дефектом**

Приняты допущения: источником намагничивающего поля является магнит в форме прямоугольного параллелепипеда шириной  $2a$  и высотой  $L$ , расположенный на расстоянии  $\Delta$  от поверхности ферромагнитного полупространства с магнитной проницаемостью  $\mu = \text{const}$ . Расстояние от плоскости симметрии несплошности до плоскости симметрии магнита –  $x_0$ . Тангенциальная  $H_{0x}$  и нормальная  $H_{0y}$ , составляющие первичного поля в произвольной точке  $A$  определяются суммарным действием фиктивных «магнитных зарядов» плотностью  $+\sigma_0$  и  $-\sigma_0$ , расположенных на противоположных торцах магнита (рассеянием магнитного поля вне боковых граней магнита пренебрегаем).



**Рисунок 2 – Расчетная схема**

Тангенциальную составляющую  $H_{xd}$  напряженности магнитного поля рассеяния дефекта определяли путем суммирования  $H_{xi}$  от действия «магнитных зарядов» на каждом из участков расчетной модели: от  $\sigma_1$  на горизонтальных участках полупространства при  $-\infty \leq x_1 \leq (x_0 - b)$  и  $(x_0 + b) \leq x_1 \leq \infty$ , от «зарядов»  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  на боковых гранях и  $\sigma_4$  на дне дефекта (рисунок 2).

При расчетах полей рассеяния дефектов *без учета неравномерности распределения «магнитных зарядов»* их плотность  $\sigma_1$  на поверхности контролируемого изделия принята пропорциональной напряженности  $H_{0y}$  в точке, находящейся на расстоянии  $x_0 = 0,5a$  от плоскости симметрии магнита;  $\sigma_4$  – пропорциональной  $H_{0y}$  в средней точке поверхности дна, а  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  – пропорциональными  $H_{0x}$  в середине каждой из боковых граней дефекта.

Для исследования влияния неравномерности распределения «зарядов» на боковых гранях дефекта на распределение магнитного поля в зоне несплошности были приняты значения  $\sigma_2 = kH_{0x}((x_0 - b), -\eta)$  и  $\sigma_3 = kH_{0x}((x_0 + b), -\eta)$ , а составляющие магнитного поля от действия этих «зарядов» рассчитывались по формулам:

$$H_x(\sigma_2) = \frac{k\sigma_0}{8\pi^2} \int_0^h \ln \left[ \frac{(((x_0 - b)^2 + a)^2 + (\Delta + \eta)^2) \cdot (((x_0 - b) - a)^2 + (\Delta + L + \eta)^2)}{(((x_0 - b)^2 - a)^2 + (\Delta + \eta)^2) \cdot (((x_0 - b) + a)^2 + (\Delta + L + \eta)^2)} \right] \times \\ \times \left[ \frac{(x - x_0 + b)}{(x - x_0 + b)^2 + (y + \eta)^2} \right] d\eta; \quad (1)$$

$$H_x(\sigma_3) = -\frac{k\sigma_0}{8\pi^2} \int_0^h \ln \left[ \frac{(((x_0 + b)^2 + a)^2 + (\Delta + \eta)^2) \cdot (((x_0 + b) - a)^2 + (\Delta + L + \eta)^2)}{(((x_0 + b)^2 - a)^2 + (\Delta + \eta)^2) \cdot (((x_0 + b) + a)^2 + (\Delta + L + \eta)^2)} \right] \times \\ \times \left[ \frac{(x - x_0 + b)}{(x - x_0 - b)^2 + (y + \eta)^2} \right] d\eta, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от магнитной проницаемости материала [2];

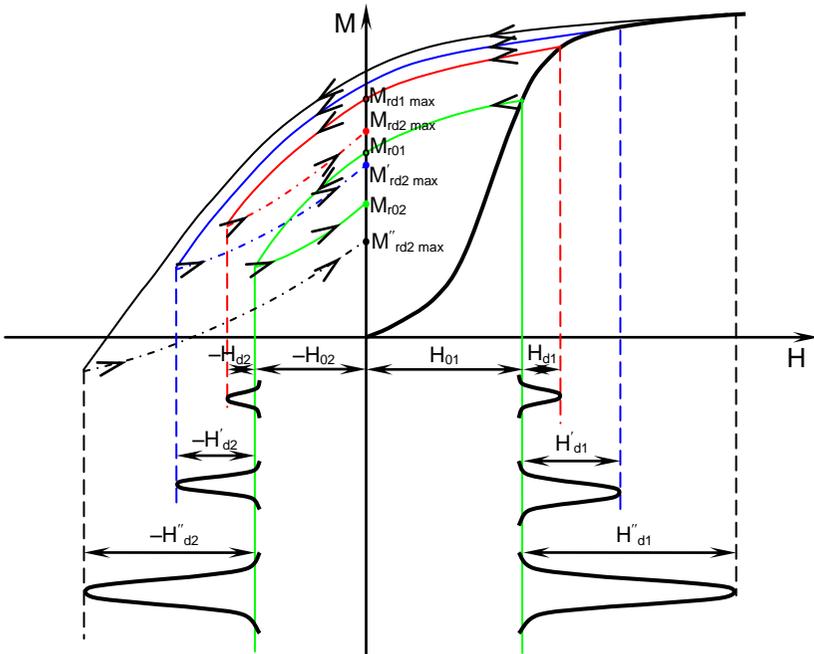
$\sigma_0$  – плотности «магнитных зарядов» на гранях магнита без учета знака.

Показано, что расчетная сигналограмма, определяемая дифференцированием тангенциальной составляющей результирующего поля в зоне дефекта, имеет асимметричный вид и содержит два положительных и два отрицательных экстремума, а ее положительная часть имеет глубокий провал. Степень асимметрии сигнала зависит от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита и объясняется нахождением боковых граней несплошности в поле разной напряженности и неравномерным распределением «магнитных зарядов» на поверхности объекта и дне дефекта. Неравномерность распределения «магнитных зарядов» на боковых стенках дефекта необходимо учитывать при глубине несплошности более 3 мм и ее расположении на расстоянии  $x_0 > 0,5a$ . Экспериментальные сигналограммы качественно близки к расчетным только для несплошностей, ширина которых больше чем в 2,5 раза превышает толщину сердечника индукционной головки дефектоскопа, что определяется разрешающей способностью прибора. Если несплошность имеет ширину меньше 2,5 мм, то характерный провал на сигналограмме отсутствует, а ее отрицательные экстремумы становятся много меньше по модулю положительного [2-А, 11-А, 14-А, 28-А].

**В пятой главе** приводятся объяснения причин смены полярности сигнала, обусловленного дефектом, при действии только тангенциальной или только нормальной составляющей напряженности внешнего магнитного поля,

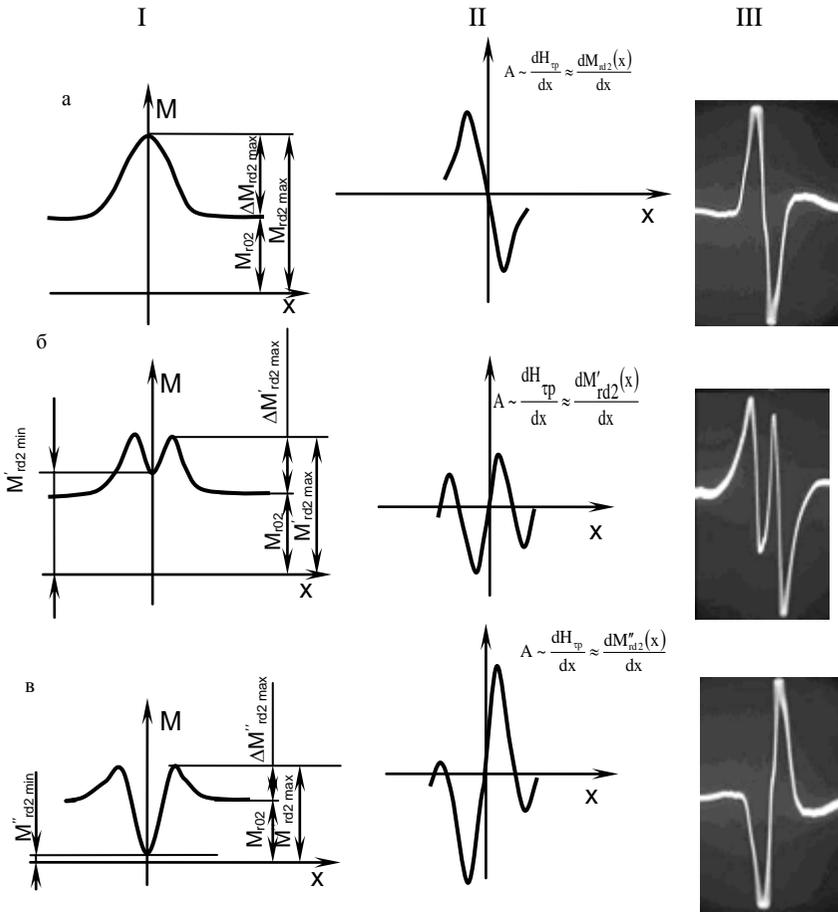
изменяющего направление на противоположное, что имеет место при перемещении магнита над объектом с уложенной лентой. Объясним, как это происходит под действием только тангенциальной составляющей напряженности поля.

При намагничивании контролируемого объекта наклоненным к его поверхности перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель тангенциальная составляющая внешнего поля направлена сначала в одну, а затем в противоположную сторону, а напряженности этих полей отличаются по модулю. Характер записи поля рассеяния дефекта на магнитоноситель при изменении глубины дефекта в этом случае проанализирован на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3 – К пояснению записи на магнитоноситель полей рассеяния дефектов малой, средней и большой глубины при тангенциальном намагничивании объекта контроля сначала в одном, а затем противоположном направлении**

Как видно из рисунка 3, при намагничивании *в одном направлении*, большей величине поля рассеяния дефекта соответствует большая остаточная намагниченность ленты, т.к. запись полей рассеяния дефектов происходит на возрастающей кривой первоначального намагничивания ее магнитной характеристики.



I – изменение остаточной намагниченности ленты в зоне действия поля рассеяния дефекта; II, III – теоретические и экспериментальные сигналограммы соответственно; а, б, в – остаточная намагниченность магнитной ленты и вид сигналограммы при обнаружении дефектов соответственно малой, средней и большой глубины.

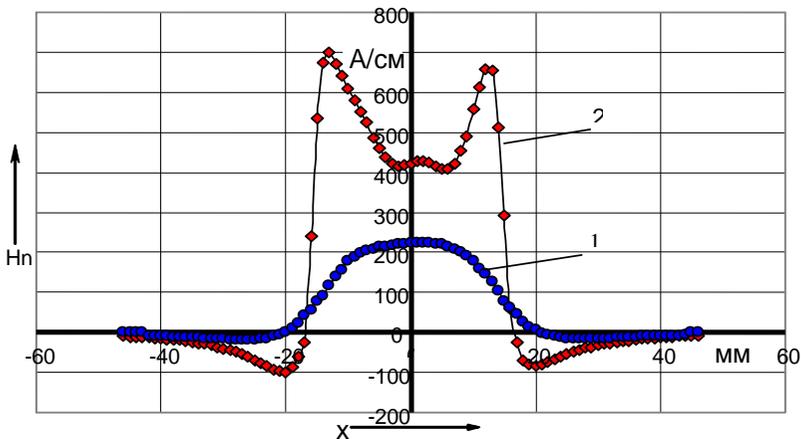
**Рисунок 4 – Характер изменения остаточной намагниченности ленты и сигнала от дефекта с увеличением его глубины при намагничивании объекта контроля параллельно поверхности сначала в одном, а затем в противоположном направлении**

При намагничивании в противоположном направлении, вследствие гистерезисных явлений в ленте и записи полей на ниспадающей ветви петли гистерезиса ленты, ее участки, находившиеся в поле рассеяния дефекта большей напряженности по мере роста крутизны ветви петли гистерезиса, приобретают меньшую остаточную намагниченность, чем участки, находившиеся в слабом поле.

Поэтому остаточная намагниченность ленты в зоне действия поля несплошности малой глубины имеет колоколообразную, а средней глубины –

седлообразную форму (рисунки 4, Ia и 4, Ib). Соответствующие им сигналограммы имеют двуполярный и трансформированный вид (рисунки 4, Pa, 4, Pb). При большой глубине несплошности – двуполярный вид (рисунок 4, Pв). Полярность полуволн сигнала зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобрела лента в месте действия поля рассеяния дефекта по сравнению с ее остаточной намагниченностью, обусловленной внешним полем (рисунок 3, рисунки 4, Ia и 4, Ib). Таким образом, из рисунков 4, II и 4, III видно, что при действии только тангенциальной составляющей внешнего поля, изменяющего направление на противоположное, вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте, сигнал о наличии дефекта при увеличении его глубины может приобрести трансформированный вид или сменить полярность полуволн.

Так как остаточная намагниченность ленты в зоне действия поля рассеяния дефекта зависит от величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта и крутизны магнитной характеристики ленты, то от этих факторов зависит вид сигнала (однополярный, двуполярный, трансформированный), обусловленного дефектом. Это подтверждается экспериментально при моделировании исследуемого способа МГМК путем намагничивания контролируемой зоны с уложенной магнитной лентой полем электромагнита сначала в одном, а затем в противоположном направлении [10-А, 16-А, 31-А].

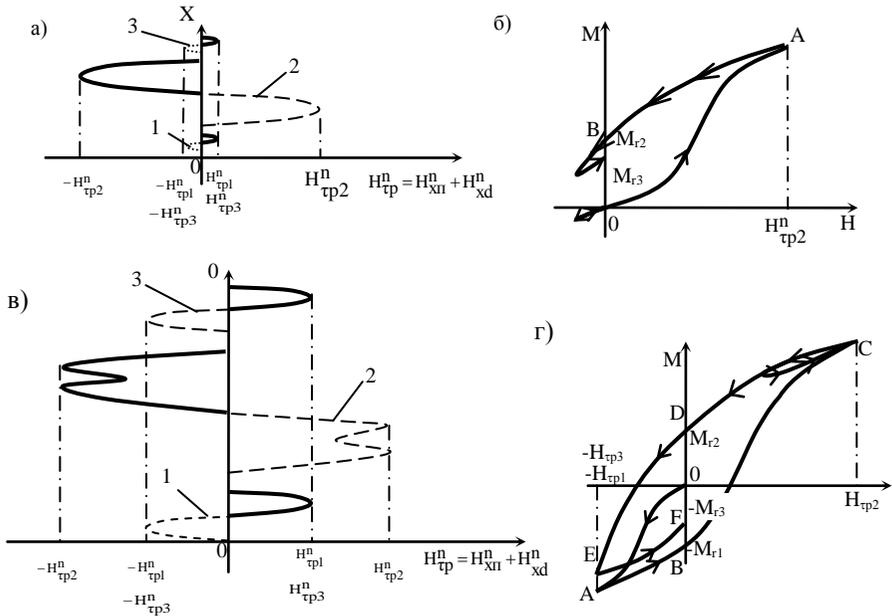


$$L = 6,5 \text{ мм} \quad (1 - \Delta = 4 \text{ мм}; \quad 2 - \text{ для } \Delta = 0,2 \text{ мм})$$

**Рисунок 5 – Распределения нормальной составляющей магнитного поля на расстоянии  $\Delta$  от поверхности грани с одним полюсом магнита в плоскости его симметрии**

Экспериментально также установлено, что сигнал, обусловленный несплошностью, может изменить полярность и при действии только нормальной составляющей поля, создаваемого перемещаемым магнитом (протяженный дефект «с дном» располагается в плоскости симметрии магнита). Это происходит, например, при изменении расстояния от магнита с близко расположенными

полусными гранями до объекта или высоты магнита. Рассмотрим изменение остаточной намагниченности участка ленты, находящегося над одной половиной дефекта и в ее окрестностях, если намагничивание объекта вместе с магнитной лентой, уложенной на его поверхность, осуществляется перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями.



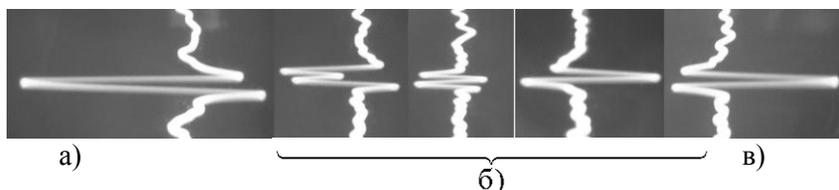
а,б – при  $\Delta = 4$  мм; в,г – при  $\Delta = 0,2$  мм. Пунктирные и сплошные линии отражают изменение поля по разные стороны плоскости симметрии дефекта: 1 – вследствие действия первой отрицательной полуволны напряженности поля магнита; 2 – при действии положительной полуволны напряженности поля магнита; 3 – под действием второй отрицательной полуволны напряженности поля магнита.

**Рисунок 6 – Изменение тангенциальной составляющей поля в зоне дефекта (а, в) и намагниченности ленты (б, г) при намагничивании объекта перпендикулярно поверхности перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями**

При расстоянии от полюса магнита до объекта более 3 мм отрицательные экстремальные значения  $H_n$  в окрестностях граней магнита невелики (изменение аналогично рисунку 5, кривая 1). Суперпозиция полей  $H_{\text{тр}}^n$ , действующих на магнитную ленту по разные стороны плоскости симметрии дефекта, показана на рисунке 6,а:  $H_{\text{тр}}^n = H_{\text{хп}}^n + H_{\text{хд}}^n$ , где  $H_{\text{хп}}^n$  и  $H_{\text{хд}}^n$  – тангенциальные составляющие напряженности поля, обусловленные магнитными полюсами на поверхности

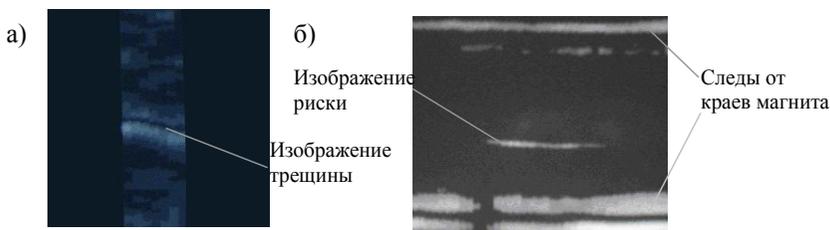
изделия и на дне дефекта соответственно, вследствие действия нормальной составляющей напряженности внешнего поля.

Изменение напряженности намагничивающего поля при перемещении магнита в этом случае показано на рисунке 6а, а намагниченности ленты – на рисунке 6б, соответствующий вид сигналограммы – на рисунке 7,в. При уменьшении расстояния до объекта отрицательные полуволны  $H_n$  достигают 90-95 А/см (изменение аналогично рисунку 5, кривая 2). Такое поле способно вызвать в зоне несплошности сильное магнитное поле, обусловленное магнитными полюсами дна дефекта и поверхности объекта в зоне несплошности, которое запишется на магнитную ленту (рисунок 6,в). В результате остаточная намагниченность над рассматриваемым участком дефекта и его окрестностями приобретет отрицательный знак ( $-M_{r3}$ ), что соответствует смене полярности сигнала (рисунок 6, г). Вид сигналограммы показан на рисунке 7, а [3-А, 5-А, 16-А, 21-А, 22-А, 25-А – 27-А, 31-А].



а – расстояние  $\Delta$  от полюса магнита до объекта 0,2 мм;  
 б – 1,75 мм  $\leq \Delta \leq 2,25$  мм; в –  $\Delta = 4$  мм.

**Рисунок 7 – Трансформация сигнала, обусловленного дефектом, при намагничивании объекта перпендикулярно поверхности перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями**



**Рисунок 8 – Дефектограмма образца с трещиной раскрытием 34 мкм (а) и с riskой (б)**

При перемещении постоянного магнита над лентой в общем случае изменения тангенциальной и нормальной составляющих поля магнита не совпадают в пространстве и времени, и корректно описать изменение намагниченности ленты в результате действия обеих составляющих поля магнита не представляется возможным.

В **шестой главе** описан разработанный программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля ферромагнитных объектов, включающий считывающий узел серийного дефектоскопа, совмещенный с компьютером, и программу обработки сигналов для отстройки от помех и представления результатов контроля в виде сигналограммы или изображения полей рассеяния дефектов на экране монитора (рисунок 8) [7-А, 18-А].

Описаны разработанный способ МГМК и устройство для его осуществления, позволяющие повысить чувствительность метода за счет более точного определения и стабилизации режима намагничивания и положения рабочей точки магнитной характеристики магнитоносителя [29-А]. С этой целью изделие вместе с уложенной на его поверхность магнитной лентой намагничивают через немагнитную прокладку или воздушный зазор, величину которых выбирают из условия обеспечения наибольшего отношения амплитуд сигнал/шум для дефекта минимального браковочного уровня.

Описано разработанное универсальное устройство на основе постоянных магнитов для намагничивания различных объектов (включая труднодоступные места) при магнитографическом контроле, позволяющее повысить мобильность, удобство, производительности контроля, снизить вес намагничивающих устройств, приведена статистическая обработка результатов контроля, позволившая определить реальную чувствительность метода. Минимальное раскрытие обнаруживаемых реальных дефектов составляет 5 мкм [1-А, 3-А, 17-А – 19-А, 23-А, 29-А, 30-А].

Описано разработанное специализированное устройство для МГМК стенок осевых каналов роторов турбин ГРЭС, позволяющее осуществлять запись полей поверхностных и подповерхностных дефектов при намагничивании объекта через уложенную на его поверхность ленту, производя контроль способом приложенного поля [31-А]. Время на контроль одного объекта – от 2 до 2,5 часов, при базовом (магнитопорошковом) методе – 2 рабочие недели. Экономический эффект от внедрения МГМК в сравнении с магнитопорошковым при контроле 6 объектов составил 69,4 млн. руб.

В приложениях приводятся результаты апробации способа МГМК на различных объектах, акты испытаний и внедрения устройств и методик контроля (№2011004НХ и №2011005НХ) в производство и в учебный процесс, сравнение достоверности традиционного и исследуемого метода контроля.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### ***Основные научные результаты диссертации***

На основании теоретических и экспериментальных исследований закономерностей формирования магнитных полей и сигналов, обусловленных дефектами в стальных ферромагнитных объектах, разработки и внедрения способов и устройств для магнитографического контроля, позволяющих отличить наиболее опасные дефекты за счет намагничивания изделий через магнитоноситель перемещаемым постоянным магнитом, определения условий контроля и их стабилизации решена задача повышения достоверности контроля ферромагнитных объектов и расширения области применения

магнитографического метода контроля ферромагнитных изделий на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов.

Основные результаты исследований сводятся к следующему:

1 Показано, что расчетная сигналограмма несплошности «с дном» ферромагнитного объекта, смещенной относительно плоскости симметрии неподвижного магнита, обращенного к объекту гранью с одним полюсом, имеет асимметричный вид и содержит два положительных и два отрицательных экстремума, а ее положительная часть имеет глубокий провал. Степень асимметрии сигнала зависит от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита и объясняется нахождением граней несплошности в поле разной напряженности и неравномерным распределением «магнитных зарядов» на поверхности объекта и дне дефекта. Неравномерность распределения «магнитных зарядов» на боковых стенках дефекта необходимо учитывать при глубине несплошности более 3 мм и ее расположении на расстоянии более 0,25 ширины полюса магнита. Экспериментальные сигналограммы качественно близки к расчетным только для несплошностей, ширина которых больше чем в 2,5 раза превышает толщину сердечника индукционной головки дефектоскопа, что определяется разрешающей способностью прибора. Если несплошность имеет ширину меньше 2,5 мм, то характерный провал на сигналограмме отсутствует, а ее отрицательные экстремумы становятся много меньше по модулю положительного [2-А, 11-А].

2 Экспериментально установлено, что при магнитографическом методе контроля с намагничиванием контролируемого объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель и считывании записи с ленты дифференциальным индукционным преобразователем, трещины, сквозные и узкие несквозные несплошности обнаруживаются двуполярным электрическим импульсом, а дефекты «с дном» (риски, широкие несквозные несплошности, углубления от поверхностных неровностей) выявляются в зависимости от условий контроля однополярным, трансформированным или двуполярным сигналом. Изменение вида сигнала, обусловленного дефектом «с дном», и смена его полярности происходят при удалении магнита от поверхности объекта, увеличении его высоты, переходе от намагничивания «углом вперед» к намагничиванию «углом назад», изменении угла наклона магнита и глубины дефекта, изменении крутизны характеристики магнитной ленты.

Для постоянного магнита с коэрцитивной силой  $H_c=2400$  А/см и остаточной индукцией  $B_r=0,39$  Тл экспериментально определены условия, при которых одновременно обеспечивается наибольшая чувствительность метода контроля и селективность к виду дефекта, при этом наиболее опасные дефекты (трещины, сквозные и узкие несквозные несплошности) обнаруживаются двуполярными сигналами, а другие дефекты (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплошности) – однополярными:

- при записи на низкокоэрцитивную ленту ( $H_c = 80$  А/см) угол наклона магнита к поверхности объекта – от  $0^\circ$  до  $5^\circ$  или от  $85^\circ$  до  $90^\circ$  при намагничивании «углом назад», от  $40^\circ$  до  $60^\circ$  – «углом вперед»; если магнит обращен к объекту гранью с одним полюсом, то расстояние  $\Delta$  между объектом контроля и магнитом

должно быть от 0 до 0,4 мм или от 4 до 11 мм, высота  $L$  магнита от 6,5 до 13 мм или от 39 до 130 мм; *при записи на высококоэрцитивную ленту ( $H_c = 260$  А/см)  $\Delta$*  должно быть от 0,4 до 11 мм, а  $L$  – от 39 до 130 мм в исследованном диапазоне  $6,5 \leq L \leq 130$  мм;

- если магнит обращен к объекту гранью с двумя полюсами, то  $\Delta$  должно быть минимальным, средняя часть магнита на отрезке, составляющем около 70 % длины грани магнита, должна перекрывать всю ширину ленты, а плоскость, разделяющая полюсы магнита, образовывать минимальный угол (но не более  $20^\circ$ ) с направлением перемещения магнита, совпадающим с предполагаемым направлением дефекта в изделии [4-А, 6-А, 8-А, 9-А].

3 Методом графической аппроксимации предельного и частных циклов гистерезиса показано и экспериментально подтверждено, что вид сигнала (однополярный, двуполярный, трансформированный), обусловленного дефектом, зависит от соотношения между остаточной намагниченностью участка ленты, находившегося в зоне действия поля рассеяния дефекта, и ее остаточной намагниченностью, вызванной полем перемещаемого магнита. Это соотношение может изменяться вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте при изменении величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта, т.к. на следе перемещаемого постоянного магнита направление намагничивания тангенциально, а в ряде случаев – нормально поверхности контролируемого объекта, изменяется на противоположное.

Сигнал от дефекта при считывании записи с ленты дифференциальной магнитной головкой имеет однополярный (или трансформированный) вид, если одна часть ленты под влиянием поля рассеяния дефекта приобретает большую, вторая – равную, а третья – меньшую остаточную намагниченность  $M_{rл}$ , чем лента под действием внешнего поля  $M_{r0}$ . Если  $M_{rл} > M_{r0}$  или  $M_{rл} < M_{r0}$ , то сигнал имеет двуполярный вид, а полярность его полуоволн зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобретают участки магнитной ленты в зоне дефекта по сравнению с ее участками, находившимися под действием внешнего поля [3-А, 4-А, 6-А, 8-А, 9-А, 10-А].

4 Для повышения чувствительности метода за счет более точного определения и стабилизации режима намагничивания и положения рабочей точки магнитной характеристики магнитоносителя предложено изделие вместе с уложенным на его поверхность магнитоносителем намагничивать через немагнитную прокладку или воздушный зазор, величину которых выбирают с помощью разработанного устройства из условия обеспечения наибольшего отношения сигнал / шум для дефекта минимального браковочного уровня. При этом уверенно обнаруживаются несплошности глубиной  $h \geq 0,15$  мм, шириной 5 мкм и более, если параметр шероховатости контролируемой поверхности  $Ra \leq 10$  мкм.

При установленных условиях новыми информационными параметрами сигналов, обусловленных дефектами, являются: *вид сигнала*, т.к. сигнал принимает однополярный или двуполярный вид в зависимости от наличия или отсутствия

«дна» у несплошности, что позволяет повысить селективность метода; *размах* (вместо амплитуды), т.к. смена полярности сигнала при изменении условий контроля происходит, минуя стадию перехода через ноль его размаха, что позволяет исключить пропуск дефектов и повысить достоверность контроля элементов матрицы штампа по сравнению с традиционным методом на 24,9 % [1-А, 3-А, 7-А – 9-А].

5 Установлено, что предварительно намагниченный проградуированный ленточный локальный магнитоноситель (ЛЛМ) из-за отсутствия обратимого участка на кривой намагничивания, позволяет измерять и слабые магнитные поля ( $H < 0,4H_c$  ЛЛМ), если направление измеряемого поля противоположно направлению остаточной намагниченности магнитоносителя. Так, ЛЛМ шириной 1,5 мм, изготовленный из ленты типа И4701-35, предварительно намагниченный полем  $120 \leq H_n \leq 200$  А/см, позволяет измерять и поля напряженностью  $H < 30$  А/см [5-А].

### **Рекомендации по практическому использованию**

Разработаны устройства и апробированы методики магнитографического контроля стенки осевого канала ротора турбины ГРЭС и деталей вагонов (№2011004НХ и №2011005НХ), основанные на намагничивании ферромагнитного объекта через уложенный на контролируруемую поверхность магнитоноситель перемещаемым постоянным магнитом, позволяющие повысить достоверность и расширить область применения метода контроля [13-А, 15-А, 18-А, 19-А].

Разработан программно-аппаратный комплекс в составе считывающего узла дефектоскопа, компьютера и программы обработки информации, позволяющий произвести отстройку от помех и представить результаты контроля в виде изображения полей рассеяния дефектов, записанных на магнитоноситель, или сигналограммы [7-А, 18-А].

Экономический эффект от внедрения МГМК стенок осевых каналов 6 роторов турбин ГРЭС в сравнении с магнитопорошковым методом составил 69,4 млн. белорусских рублей. Разработанные способы МГМК [29-А, 33-А], полезная модель [30-А, 32-А] и программно-аппаратный комплекс [7-А] внедрены в учебный процесс на кафедре «Физические методы контроля» Белорусско-Российского университета. Результаты диссертационной работы используются при обучении специалистов магнитному методу контроля в рамках их сертификации.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### *Статьи в научных журналах*

1-А. Новиков, В.А. Определение реальной чувствительности магнитографического метода контроля, основанного на намагничивании объекта через уложенный на его поверхность магнитоноситель /В.А.Новиков, Г.И. Скрыбина, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Вестник МГТУ.–Могилев.– «Белорусско-Российский университет».– 2004.–№2 –С.76-80.

2-А. Новиков, В.А. Исследование распределения напряженности магнитного поля у поверхности ферромагнитного объекта намагничиваемого перемещаемым постоянным магнитом /В.А.Новиков, Г.И. Скрыбина, А.В. Кушнер, А.В. Шилов

//Вестник МГТУ.–Могилев.–«Белорусско-Российский университет».– 2004.–№ 2.– С. 81–84.

3-А. Новиков, В.А. Исследование вида сигналограмм при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта через магнитоноситель /В.А.Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Метрология и приборостроение.–2004.–№4.– С. 15- 20.

4-А. Новиков, В.А. Новые возможности магнитографической дефектоскопии /В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Сборник научных трудов /Уфа, 2009. –«Промышленная безопасность на взрывоопасных и химически опасных производственных объектах».– С.163-168

5-А. Новиков, В.А. Измерение напряженности магнитного поля у поверхности ферромагнитного объекта /В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Дефектоскопия.–2010. – №5. – С.25-28.

6-А. Новиков, В.А. Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель. Схемы намагничивания /В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Дефектоскопия. – 2010.– №6. – С.30 – 35.

7-А. Кушнер, А.В. Программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля /А.В. Кушнер, А.В. Шилов, В.А. Новиков //Дефектоскопия. – 2010. – №6.– С.36-40.

8-А. Новиков, В.А. Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель I. /В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Дефектоскопия.– 2010. – №7.– С. 42-50.

9-А. Новиков, В.А. Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель II. /В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Дефектоскопия.– 2010. – №7.– С. 51-58.

10-А. Новиков, В.А. Запись поля дефекта на магнитную ленту при тангенциальном намагничивании полями последовательно противоположных направлений /В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов //Дефектоскопия. – 2010. – №8. – С.54-60.

11-А. Новиков, В.А. Магнитное поле в зоне поверхностного дефекта объекта, намагниченного стационарным малогабаритным магнитом. //В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Кушнер //Вестник Белорусско-Российского университета.–Могилев.–«Белорусско-Российский университет».– 2010.–№ 4.– С. 159-165.

### ***Материалы конференций***

12-А. Кушнер, А.В. Некоторые особенности обнаружения дефектов в ферромагнитных изделиях при намагничивании контролируемой поверхности перемещаемым над ней постоянным магнитом /А.В. Кушнер, В.А. Новиков //Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы Международной научно-техн. конф.,

Могилев, 25-26 октября 2001 г. //Могилевский гос. техн. ун-т.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2001 – С.350.

13-А. Кушнер, А.В. Особенности построения программно-аппаратного комплекса для магнитографического контроля ферромагнитных изделий /А.В. Кушнер, В.А. Новиков //Современные технологии, материалы, машины и оборудование: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 16-17 мая 2002 г. //Могилевский гос. техн. ун-т.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2002 – С.377-378.

14-А. Кушнер, А.В. Обнаружение несплошностей в ферромагнитных объектах магнитографическим методом при намагничивании зоны контроля перемещаемым над ней постоянным магнитом/А.В. Кушнер, В.А. Новиков //Современные технологии, материалы, машины и оборудование: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 16-17 мая 2002 г. //Могилевский гос. техн. ун-т.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2002 – С.379-380.

15-А. Кушнер, А.В. Некоторые особенности магнитографического контроля ферромагнитных изделий при намагничивании перемещаемым постоянным магнитом /А.В. Кушнер, В.А.Новиков, ГИ. Скрябина //Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 15-16 мая 2003 г. //Могилевский гос. техн. ун-т.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2003 – С.526-528.

16-А. Кушнер, А.В. Экспериментальное исследование формирования сигнала, обусловленного дефектом, при магнитографическом контроле объектов, намагничиваемых перемещаемым над контролируемой поверхностью постоянным магнитом /А.В. Кушнер, В.А. Новиков, А.И. Чернышевич, А.А. Ковальков // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 15-16 мая 2003 г. //Могилевский гос. техн. ун-т.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2003 – С.529-530

17-А. Кушнер, А.В. Способ магнитографического контроля ферромагнитных объектов и устройство для его осуществления /А.В. Кушнер, В.А. Новиков, А.П. Мычик //Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 22-23 апреля 2004 г.//Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – Ч. 2. – С.268-269.

18-А. Кушнер А.В. Применение цифровой обработки сигналов в магнитографическом контроле ферромагнитных объектов /А.В. Кушнер, В.А. Новиков, Г.И. Скрябина //Современные методы и приборы качества и диагностики состояния объектов: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 20-22 мая 2003 г. // Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004 – С.213-214.

19-А. Кушнер, А.В. Применение магнитографического метода для контроля стенок осевых каналов роторов турбин /А.В. Кушнер, А.В. Шилов, В.А. Новиков //Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 21-22 апреля 2005 г.//Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – Ч. 1. – С.361

20-А. Кушнер, А.В. Магнитографический контроль с намагничиванием объекта через магнитоноситель /А.В. Кушнер, В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Шилов //Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 2-й Международной научно-техн. конф., Могилев 19-20 октября 2006 г.// Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С.65-67.

21-А. Новиков, В.А. Исследование влияния гистерезисных явлений в магнитной ленте на вид сигнала от дефекта /В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Шилов, А.В. Кушнер //Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 19-20 апреля 2007 г.//Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 2. – С.180.

22-А. Кушнер, А.В. Некоторые особенности магнитографического контроля с намагничиванием объекта через магнитоноситель /А.В. Кушнер //Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной конф. молодых ученых, Могилев, 20-21 ноября 2008 г. //Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С.153.

23-А. Кушнер, А.В. Особенности магнитографического контроля деталей вагонов /А.В. Кушнер //Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 17-18 апреля 2008 г.//Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 3. – С.206.

24-А. Шилов, А.В. Дополнительные информативные параметры сигналов при магнитографическом контроле/ А.В. Шилов, А.В.Кушнер //Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. конф. молодых ученых, Могилев 19-20 ноября 2009 г.//Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.].–Могилев, 2009. – С.133.

25-А. Новиков, В.А. Запись полей дефектов средней и большой глубины при намагничивании объекта через магнитоноситель /В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Кушнер //Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 16-17 апреля 2009 г. /Белорусско-Российский университет; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. –Могилев, 2009. – Ч.2. – С. 255-256.

26-А. Новиков, В.А. Теоретические исследования влияния условий магнитографического контроля на выявляемость дефектов объекта/ В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Кушнер, А.В. Шилов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 3-й Международной научно-техн. конф., Могилев 23-25 сентября 2009 г.// Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.], Могилев.–2009.–С.67-69.

27-А. Новиков, В.А. Экспериментальные исследования влияния условий магнитографического контроля на выявляемость дефектов объекта/ В.А. Новиков, А.В. Кушнер, А.В. Шилов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 3-й Междунар. научно-техн. конф.,

Могилев 23-25 сентября 2009 г.// Белорусско-Российский университет: И.С. Сазонов [и др.], Могилев.–2009.– С.70-72.

28-А. Новиков, В.А. Магнитное поле в зоне поверхностного дефекта объекта, намагниченного стационарным малогабаритным магнитом /В.А. Новиков, Г.И. Скрябина, А.В. Кушнер // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-техн. конф., Могилев, 22-23 апреля, 2010 г. //Белорусско-российский университет: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 2. – С.270-271.

### ***Патенты на изобретения и полезные модели***

29-А. Пат. 6102 С1 ВУ, МПК G 01 N 27/85. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов и устройство для его осуществления/ Кушнер А.В., Новиков В.А.; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский ун-т.–N a20001118; заявл.19.12.2000; опубл.30.06.2004, Бюл. №12.– 5 с.

30-А. Пат. 4569 U ВУ, МПК G01N 27/72. Намагничивающее устройство для магнитографической дефектоскопии /Шилов А.В., Кушнер А.В., Новиков В.А.; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский ун-т.– № u20080814; заявл. 26.10.2007; опубл. 30.08.2008, Бюл. №4. –2с.

31-А. Пат. 12508 МПК G01N 27/72 Способ измерения магнитного поля на поверхности исследуемого объекта (варианты) /В.А. Новиков, А.В. Шилов, А.В. Кушнер; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский ун-т.–№ a200880675; Заявл. 26.05.2008;Опубл. 30.10.2009. – № 5 – 4 с.

32-А. Пат. 5447 U ВУ, МПК G01N 27/72. Намагничивающее устройство для магнитографической дефектоскопии стенок сквозных каналов/Шилов А.В., Кушнер А.В., Новиков В.А.; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский ун-т. – № u20070751; заявл. 04.11.2008; опубл. 30.08.2009, Бюл. № 4. –2с.

33-А. Пат. 12939 С1 ВУ, МПК G 01 N 27/82. Способ магнитографического контроля изделия из ферромагнитного материала (варианты) /В.А. Новиков, А.В. Шилов, А.В. Кушнер; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский ун-т.–№ a20001118; заявл.21.11.2007; опубл. 28.02.2010, Бюл. №1.– 4с.

### ***Ссылки на другие работы***

1. Пат. 2154818 RU, МКИ7 G01N 27/85. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий /В.А. Новиков; заявитель и патентообладатель Могилевский машиностроительный институт. – №96111357.– заявл. 03.06.96; опубл. 20.08.2000. Бюл. №23. – 8с.: ил.

2. Загидулин, Р.В. Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине /Р.В. Загидулин, В.Ф. Мужицкий //Дефектоскопия. – 2002. – №11. – С.17-25.

## РЕЗЮМЕ

Кушнер Андрей Валерьевич

Магнитографический метод контроля при намагничивании изделий перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель

**Ключевые слова:** магнитографическая дефектоскопия, постоянные магниты, ферромагнитные объекты, полярность сигнала, условия контроля.

**Объект исследования** – ферромагнитные образцы, содержащие искусственные или естественные дефекты сплошности.

**Предмет исследования** – магнитные поля, создаваемые дефектами, при намагничивании объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель и сигналы, возникающие при считывании записи с магнитной ленты, на экране дефектоскопа.

**Цель работы** – повышение достоверности обнаружения дефектов в ферромагнитных объектах на основе разработки и внедрения способов и устройств для магнитографического контроля, позволяющих отличить наиболее опасные дефекты за счет намагничивания изделий через магнитоноситель перемещаемым постоянным магнитом, определения условий контроля и их стабилизации.

**Методы и аппаратура для исследований.** Методы: «магнитных зарядов», графо-аналитический, линейно-угловых измерений, магнитных измерений, оптических измерений, металлографического анализа, статистические методы обработки результатов измерений.

При экспериментальных исследованиях применяли миллитесламетр ИОН-3, магнитографический дефектоскоп МДУ-2У, программно-аппаратный комплекс, микровольтампервеберметр Ф-18, измерительный микроскоп ЕС МЕТАМ РВ-21.

**Полученные результаты.** Закономерности изменения сигналов, обусловленных дефектами, при магнитографическом контроле объектов, намагничиваемых перемещаемым постоянным магнитом через уложенный на контролируемую поверхность магнитоноситель. Способы и технические средства для измерения слабых магнитных полей в непосредственной близости от объекта, для определения требуемого режима намагничивания, записи полей рассеяния дефектов в труднодоступных местах, получения изображения полей рассеяния дефектов, записанных на ленту. Устройства и программы магнитографического контроля, позволяющие уверенно обнаруживать поверхностные трещины глубиной  $h \geq 0,15$  мм, шириной 5 мкм и более, если шероховатость контролируемой поверхности  $Ra \leq 10$  мкм. Результаты использованы при контроле стенок осевых каналов роторов турбин ГРЭС и деталей вагонов, внедрены в учебный процесс. Рекомендуется использовать для обнаружения дефектов на глубине до 3 мм в ферромагнитных объектах: гибы труб энергоустановок, балки несущих конструкций, винты судов, стенки осевых каналов роторов турбин, лопасти летательных аппаратов, оси и опоры вагонов, буровое оборудование и др.

**Область применения.** Дефектоскопия ферромагнитных объектов ответственного назначения.

## РЭЗІЮМЭ

Кушнер Андрэй Валер'евіч

Магнітаграфічны метада кантролю пры намагнічванні вырабаў перамяшчальным сталым магнітам праз магнітаносбіт

**Ключавыя словы:** магнітаграфічная дэфектаскапія, сталыя магніты, ферамагнітныя аб'екты, палярнасць сігналу, умовы кантролю.

**Аб'ект даследавання** - ферамагнітныя ўзоры, утрымоўвальныя штучныя або натуральныя дэфекты суцэльнасці.

**Прадмет даследавання** - магнітныя палі, створаныя дэфектамі пры намагнічванні аб'екта перамяшчальным сталым магнітам і сігналы, якія ўзнікаюць пры счытванні запісу з магнітнай стужкі на экране дэфектаскопа.

**Мэта працы** – павышэнне дакладнасці выяўлення дэфектаў у ферамагнітных аб'ектах на аснове распрацоўкі і ўкаранення спосабаў і прылад для магнітаграфічнага кантролю, якія дазваляюць адрозніць найбольш небяспечныя дэфекты за кошт намагнічвання вырабаў праз магнітаносбіт перамяшчальным пастаянным магнітам, вызначэнне умоў кантролю і іх стабілізацыя.

**Метады і апаратура для даследаванняў.** Метады "магнітных зарадаў", графа-аналітычны, лінейна-кутніх вымярэнняў, магнітных вымярэнняў, аптычных вымярэнняў, металаграфічнага аналізу, статыстычныя метады апрацоўкі вынікаў вымярэнняў.

Пры эксперыментальных даследаваннях ужывалі мілітэсламетр ИОН-3, магнітаграфічны дэфектаскоп МДУ-2У, праграма-апаратны комплекс, мікравольтампереверметр Ф-18, вымяральны мікраскоп ЕС МЕТАМ РВ-21.

**Атрыманыя вынікі.** Заканамернасці змены сігналаў, абумоўленых дэфектамі, пры магнітаграфічным кантролі аб'ектаў, намагнічаных перамяшчальным сталым магнітам праз выкладзены на кантраляваную паверхню магнітаносбіт. Спосабы і тэхнічныя сродкі для вымярэння слабых магнітных палёў у непасрэднай блізкасці ад аб'екта, для азначэння патрабаванага рэжыму намагнічвання, запісы палёў дэфектаў у цяжкадаступных месцах, атрыманы малюнка палёў дэфектаў, запісаных на стужку. Прылады і праграмы магнітаграфічнага метада кантролю, якія дазваляюць упэўнена выяўляць павярхоўныя расколіны глыбінёй  $h \geq 0,15$  мм, шырынёй 5 мкм і больш, калі шурпатасць кантраляванай паверхні  $Ra \leq 10$  мкм.

Вынікі выкарыстаны пры кантролі сценак восевых каналаў ротараў турбін ГРЭС і дэталей вагонаў, укаранены ў вучэбны працэс. Рэкамендуецца выкарыстоўваць для выяўлення дэфектаў на глыбіні да 3 мм у ферамагнітных аб'ектах: гібах труб энергаўстановак, бэльках апорных канструкцый, шрубам суднаў, сценах восевых каналаў ротараў турбінаў, лопасцях лятальных апаратаў, восях і апорах вагонаў, свідравым абсталеванні і інш.

**Вобласць ужывання.** Дэфектаскапія ферамагнітных аб'ектаў адказнага прызначэння.

## SUMMARY

Kushner Andrey Valerevich

Magnitographic method of the testing ferromagnetic products by their magnetisation by a moved constant magnet through a magnetic tape

**Keywords:** magnitographic the testing, constant magnets, ferromagnetic objects, polarity of a signal, a control condition.

**Object of research** – the ferromagnetic samples containing artificial or natural defects.

**Subject of research** – the magnetic fields created by defects, at object magnetisation by a moved constant magnet and the signals arising at reading of record from a magnetic tape, on the screen defectoscope.

**The work purpose** – increase the reliability of detecting defects in ferromagnetic objects based on the development and implementation of methods and devices for magnitographic testing, allowing to distinguish the most dangerous defects due to the magnetization of products through magnetic tape movable permanent magnet, the definition of testing environment and to stabilize them.

**Methods and equipment for researches.** Methods of "magnetic charges», grafo-analytical, linearly-angular measurements, magnetic measurements, optical measurements, metallographic analysis, statistical methods of processing of results of measurements. At experimental researches applied magnetic inductometer ИОН-3, magnitographic defectoscope МДУ-2У, a hardware-software complex, microvoltamperfluxmeter Ф-18, measuring microscope EC METAM PB-21.

**The received results.** Laws of change of the signals caused by defects, at magnitographic the control of the objects magnetised by the moved constant magnet through laid on controllable surface magnetic tape. Ways and means for measurement of weak magnetic fields in immediate proximity from object, for definition of a demanded mode of magnetisation, record of fields of defects in hard-to-reach spots, receptions of the image of fields of the defects which have been written down on a tape. Devices and the techniques allowing confidently to find out a superficial crack by depth  $h \geq 0,15$  mm, width 5 microns and more, if a roughness of controllable surface  $Ra \leq 10$  a micron. Results are used at the control of walls of axial channels of rotors of turbines of a state district power station and details of cars, introduced in educational process. It is recommended to use for detection of defects on depth to 3 mm in ferromagnetic objects: pipes bends of power installations, a beam of bearing designs, screws of courts, walls of axial channels of rotors of turbines, blades of flying machines, axes and support of cars, the chisel equipment, etc.

**Scope.** Inspection ferromagnetic objects of responsible appointment.